

慧眼卫星对黑洞X射线双星的爆发演化研究*

马瑞灿^{1,2†}

(1 中国科学院高能物理研究所粒子天体物理重点实验室 北京 100049)

(2 中国科学院高能物理研究所东莞中子科学中心 东莞 523808)

摘要 得益于慧眼硬X射线调制望远镜(Insight Hard X-ray Modulation Telescope, *Insight-HXMT*)卫星的宽波段(1–250 keV)和大有效面积, 其在轨运行期间取得了一系列重要的科学成果. 慧眼监测了一批黑洞X射线双星的爆发演化, 这为研究黑洞X射线双星爆发期间的吸积性质提供了重要观测数据. 这些黑洞暂现源的爆发不仅包括经历了硬态、中间态和软态的典型完整爆发, 还包括了仅演化到硬态或中间态的“失败的态转换爆发”. 慧眼的宽波段数据不仅为深入理解黑洞X射线双星的吸积盘、冕和喷流性质提供了重要契机, 也为研究源的爆发机制以及吸积辐射物理提供了重要观测证据. 使用慧眼数据, 重点介绍了获得的黑洞X射线双星爆发期间演化和性质.

关键词 吸积, 吸积盘, X射线, 双星, 恒星: 黑洞

中图分类号: P142; **文献标识码**: A

1 引言

黑洞X射线双星由一个黑洞和一颗伴星组成. 当伴星物质被黑洞吸积时, 会释放大量引力势能, 产生强烈的X射线辐射, 有时还会伴随着盘风和相对论性喷流. 这使得我们能够直接研究靠近黑洞区域的复杂吸积辐射物理过程, 包括黑洞吸积盘的动力学以及喷流形成机制等. 然而, 由于目前观测能力的限制, 无法实现黑洞X射线双星的直接成像, 主要通过能谱和时变特性来理解吸积流的几何和性质.

能谱分析显示, X射线辐射主要由吸积盘^[1]、热电子康普顿化形成的高能冕(其辐射能量可延伸至100 keV^[2])以及反射成分(包括6.4–7 keV的铁线和20–30 keV的康普顿鼓包)组成^[3]. 在时变性质上, 呈现出不同时间尺度的变化, 其中一类重要的观

测现象是准周期振荡(Quasi-Periodic Oscillation, QPO)^[4–5].

慧眼硬X射线调制望远镜(Insight Hard X-ray Modulation Telescope, *Insight-HXMT*)卫星是中国研制的第1颗空间X射线天文卫星, 它的成功发射和运行标志着中国在空间天文领域迈出了重要一步^[6]. HXMT的能段为1–250 keV, 具备宽波段、大视场以及大有效面积的优势, 并且在观测亮源时不存在堆积效应, 在研究黑洞、中子星等高能天体的短时标光变和宽波段能谱的性质等方面具有独特的优势. HXMT在轨运行近7 yr, 取得了一系列重要的科学成果^[7–9]. HXMT的高频次观测和1–250 keV的宽波段覆盖能力使其在探测和研究暂现源的爆发, 例如黑洞X射线双星的爆发方面具有独特优势, 为揭示黑洞X射线双星系统的辐射机制

2024-10-11收到原稿, 2025-02-17收到修改稿

*国家重点研发计划(2021YFA0718500)

†maruican@ihep.ac.cn

提供了宝贵的数据支持,也为理论模型的建立和验证提供了关键的实验依据.

本综述将系统地回顾黑洞X射线双星爆发演化的性质,总结当前HXMT卫星在黑洞X射线双星爆发演化方面的重要科学成果.

2 黑洞X射线双星的爆发演化过程

大部分黑洞X射线双星为暂现源,即源在宁静态停留几个月甚至数十年后吸积率会突然增加,呈现持续几周到几个月的X射线爆发.根据黑洞暂现源在X射线波段的性质,其“典型爆发”可以分为不同的能态,其爆发轨迹在硬度-强度图(Hardness-Intensity Diagram, HID)中呈逆时针的“q”形状^[10-12].在爆发开始时,源从宁静态进入(低)硬态((Low) Hard State, (L)HS),能谱由非热组分主导,其幂律指数一般在1.5-2.1之间^[4, 13].在硬态时,吸积盘通常被认为是截断的,截断半径为数十至数百个引力半径(R_g)^[14-16].但是,一些研究显示,在硬态时监测到的宽铁线^[17]暗示着吸积盘保持在或接近最内稳定圆轨道处^[18].在功率密度谱上,会展现出显著的QPO,通常为type-C QPO和强的宽带噪声特征^[19].在硬态时,一般也存在持续、致密的喷流^[20].随着源亮度的增加,吸积盘的内半径减小^[21],盘温度增加,热盘成分与非热冕成分的辐射相当^[22],表明源进入中间态(Intermediate State, IMS)^[1, 12].中间态可以进一步分为硬中间态(Hard Intermediate State, HIMS)和软中间态(Soft Intermediate State, SIMS),软中间态的能谱比硬中间态的能谱更软.硬态和硬中间态的强宽带噪声和type-C QPO被相对较弱的宽带噪声和type-B QPO所取代^[23].在中间态,致密的喷流通常被抑制,高度相对论的间歇性喷流出现^[24].当源进入(高)软态((High) Soft State, (H)SS),能谱被热的吸积盘成分主导,非热成分的幂律指数增大,通常大于2.1^[1].有时,会在软态观测到弱的type-A QPO以及幂律噪声^[25].在这种能态下,喷流通常无法被探测到,且普遍认为吸积盘的内半径达到最内稳定圆轨道.随着爆发演化,源的辐射流量减小,其从中间态回到硬态,并最终回到宁静态,完成一次完整的典型爆发.

通过对以上黑洞暂现源的典型爆发研究可以帮助我们理解黑洞X射线双星的吸积过程及其背后的物理机制.但对于一些黑洞暂现源的爆发,其并没有达到软态,源的能谱仍由幂律成分主导,此类爆发即“失败的态转换爆发”^[26-29].图1展示了不同类型爆发的HID轨迹.失败的态转换爆发并不是罕见的,约占所有爆发的38%^[27].失败的态转换爆发的形成原因可能是由于源的吸积率太低,低于0.1倍的爱丁顿光度,以至于吸积盘的内半径不能达到最内稳定圆轨道,冕也不能冷却塌缩^[27-28].还有一种“失败爆发”的情况,这类爆发可能没有明显的初始硬态,或者由于初始硬态过于微弱或持续时间过短,未能达到现有卫星监测的灵敏度阈值从而未被探测到.这类“失败爆发”现象相当罕见,迄今为止只在极少数源中观察到.因此,本文不会深入探讨这类“失败爆发”.感兴趣的读者可以查阅文献[30-32]以获取更多详细信息.得益于HXMT卫星的宽波段覆盖和高频次监测能力,其数据在研究黑洞X射线双星的爆发过程中发挥着重要作用,包括“经典爆发”以及不同类型的“失败爆发”,不仅可以扩充黑洞X射线双星的爆发样本,还能理解黑洞暂现源的吸积几何演化和辐射机制提供重要参考.

3 慧眼对黑洞X射线双星爆发演化的观测案例

自2017年发射以来,慧眼卫星凭借其宽波段覆盖(1-250 keV)和大有有效面积的优势,在7 yr的稳定运行中积累了大量宝贵的观测数据.其中,针对黑洞X射线双星(例如MAXI J1820+070、MAXI J1348-630和Swift J1727.8-1613等)的观测时间累计已超过24 Ms.这些观测数据在能谱分析和时变特性研究等方面提供了至关重要的支持,特别是为深入理解黑洞X射线双星的吸积盘、冕和喷流特性开辟了新的研究契机,同时为探究其爆发机制及吸积辐射的物理过程提供了重要证据.本节将结合若干典型案例,特别是具有完整爆发观测数据的明亮源,系统阐述慧眼卫星在黑洞X射线双星爆发演化研究方面取得的重要科学成果.

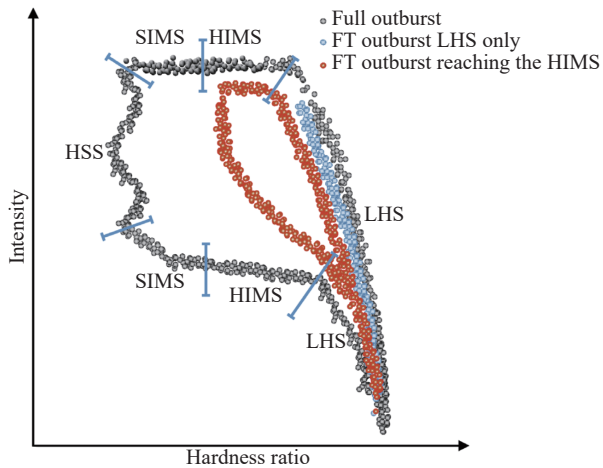


图 1 黑洞X射线双星的硬度-强度图. 黑色点代表黑洞的典型爆发(黑洞双星系统经历了从LHS, 经HIMS、SIMS到达HSS, 随后再经SIMS、HIMS, 最终回到LHS的完整爆发过程), 蓝色和红色点分别代表仅到达硬态和中间态的“失败的态转换爆发”(Failed Transition, FT). 图取自Alabarta等^[29].

Fig. 1 The hardness-intensity diagram of black hole X-ray binaries. Black dots represent typical outbursts (The black hole binary system experienced a complete outburst from the LHS, through the HIMS, the SIMS to the HSS, and then through the SIMS, the HIMS, and finally back to the LHS.), while blue and red dots indicate failed transition (FT) outbursts that only reach hard and intermediate states, respectively. The figure is from Alabarta et al.^[29].

3.1 MAXI J1820+070在2018年的爆发研究

MAXI J1820+070是于2018年3月由MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image)发现的新黑洞X射线双星. HXMT对其整个爆发过程进行了宽波段(1–250 keV)的连续监测, 取得了一系列重要的科学成果. 例如, You等^[9]利用HXMT观测数据开展能谱分析, 研究了该源在硬态期间冕与吸积盘的动态演化. 作者提出, 当冕在向黑洞收缩的同时, 其流出速度也在增加. 盘冕吸积几何的动态演化见图2. 这一结果对理解黑洞X射线双星中冕的物理特性及喷流形成机制具有重要意义. 此外, Ma等^[8]探测到该源在整个爆发过程中高达200 keV的QPO, 也为喷流物理机制的研究提供了关键观测证据.

此外, Peng等^[33]基于HXMT的数据对MAXI J1820+070进行了深入分析, 揭示了该源在2018年

爆发期间3个阶段内软硬X射线光子之间的时间滞后现象. 研究结果表明, 在爆发的前两个阶段, 低能(低于140 keV)光子滞后于高能(140–170 keV)光子, 而在爆发的衰减阶段, 情况则相反, 高能光子滞后于低能光子, 这些滞后的时间尺度均在数天的量级. 在考虑了不同能段光子之间的时间差异后, 可以对硬度-强度图中的典型“q”形状进行校正, 使其转换为线性关系. 此外, 文章基于时变分析的结果, 进一步探讨了冕的可能演化过程: 从爆发初期覆盖在吸积盘上的径向冕, 逐渐演化为一个垂向收缩的喷流状冕, 在爆发衰减阶段冕先垂向扩展, 最终重新覆盖在吸积盘上. 该工作为理解黑洞X射线双星系统中盘冕结构的演化提供了新的视角.

You等^[34]还通过结合HXMT的X射线数据以及AAVSO (American Association of Variable Star Observers)的光学观测和AMI-LA (Arcminute Microkelvin Imager-Large Arrays)的射电数据, 研究了X射线双星爆发过程中磁囚禁盘(Magnetically Arrested Disk, MAD)的形成机制. 研究结果表明, 射电和光学流量相对于X射线流量分别滞后约8 d和17 d. 作者认为, 这种延迟可能是由于X射线爆发期间, 吸积盘中的磁场被扩展的冕所放大, 从而形成磁囚禁盘. 此外, 他们提出, 外盘的热粘滞不稳定性可能是导致光学波段延迟的关键因素. 这一研究不仅揭示了吸积盘磁场演化与多波段辐射之间的联系, 还为理解黑洞吸积盘大尺度磁场的形成及其动力学过程提供了重要的观测证据.

3.2 MAXI J1348–630在2019年的爆发研究

Zhang等^[35]基于HXMT和Swift上搭载的X射线望远镜(X-ray Telescope, XRT)的数据, 深入分析了黑洞X射线双星MAXI J1348–630在2019年爆发期间的能谱性质. 该源在爆发后从硬态演化到中间态和软态, 并再次回到中间态和硬态, 完成了一次完整爆发, 遵循黑洞暂现源的经典爆发轨迹, 在HID图中呈现出“q”的形状. 在整个爆发期间, 该源的能谱可以用多温盘和幂律模型很好地拟合. 在软中间态和软态时, 盘光度 L 和色温度 T_{in} 之间符合标准关系, 即 $L \propto T_{in}^4$, 表明此时吸积盘的内

半径 R_{in} 是稳定的(抵达最内稳定圆轨道).但在爆发期间的其他阶段, MAXI J1348–630展现了不同寻常的行为,与黑洞暂现源的典型爆发演化不一致:在爆发初期的硬态阶段,吸积盘的内半径比软态期间的更小,色温度更高(盘冕的参数演化见图3).吸积盘的这种特殊行为在一定程度上可以被自洽的康普顿化模型解释,例如`simplcut * diskbb`¹和`diskir`²模型.这类模型考虑了吸积盘上的光子由于高能冕产生的逆康普顿散射效应.但是,即使考虑了冕的散射效应,吸积盘的这种特殊行为仍然存在.为了解释盘内半径增加与色温减小的异常趋势,作者提出,爆发初期的硬化因子大于典型

值(约1.7).进一步的分析显示,吸积盘内半径和温度之间的这种演化趋势确实要求硬化因子的变化,即从硬态的约3.5演化到硬中间态的约1.7.作者认为硬化因子的演化揭示了一个真实并且可能很少见的吸积盘的演化过程:在爆发初期,内盘处于由光学薄的介质凝聚的过程,尚未达到足够高的光学深度,因此其能谱无法用标准的光学厚盘建模.随着爆发演化,源从硬态转换到硬中间态,吸积盘的密度持续增加并达到平衡.这些发现对于理解黑洞X射线双星的爆发演化和吸积盘动力学具有重要意义.

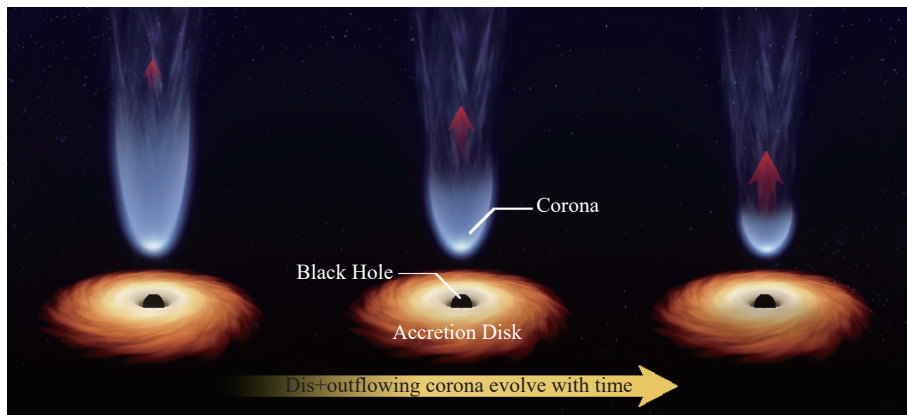


图 2 爆发衰减阶段冕的演化示意图.冕辐射的硬光子照射吸积盘产生反射成分.随着爆发的演化,冕逐渐向黑洞收缩,其高度降低,同时反射分数减小,表明冕的整体运动速度加快.图取自You等^[9].

Fig. 2 Schematic illustration of the corona evolution during the decay phase of the outburst. Hard photons emitted from the corona irradiate the accretion disc, producing a reflection component. As the outburst evolves, the corona gradually contracts toward the black hole, its height decreases, and the reflection fraction reduces, indicating an acceleration of the overall coronal motion. The figure is from You et al.^[9].

Weng等^[36]通过对2019年爆发的黑洞X射线双星MAXI J1348–630的详细时变分析,揭示了吸积盘和冕之间的辐射时间延迟导致迟滞效应以及“q”形硬度-强度图.该研究利用了HXMT和Swift卫星的宽波段(1–150 keV)的X射线和紫外观测数据,发现了吸积盘的软X射线辐射相对于冕的硬

X射线辐射存在显著的时间延迟.图4展示了软X射线的延迟.作者给出了MAXI J1348–630在整个爆发过程的物理图像,即来自冕的硬X射线爆发几乎无延迟地引起外盘的光学增亮;此后,外盘的吸积增强并向内传播,导致延迟的软X射线爆发,其延迟时间尺度为粘滞时间尺度(约8–12 d).这一

¹ `simplcut`是一种以内核为截断幂律的热康普顿化模型,将其与多温黑体盘模型`diskbb`卷积后,可构建一个考虑种子光子被散射至高能冕区的盘-冕模型.

² `diskir`与`simplcut`相似,其主要区别在于内核采用的是热康普顿化连续谱.

发现对于理解吸积盘和冕之间的能量传递及其相互作用机制至关重要. 通过校正这种时间延迟, 作者重新解释了硬度-强度图, 即热盘流量和非热幂律流量之间呈现出线性相关性, 这与之前的非线性“q”形轨迹形成了显著对比. 此外, 作者还讨论

了这种时间延迟的机制可能普遍适用于其他黑洞X射线双星系统. 该研究结果不仅对之前关于吸积流和辐射特性由质量吸积率唯一决定的观点提出挑战, 而且为未来的观测和理论模型提供了新的视角.

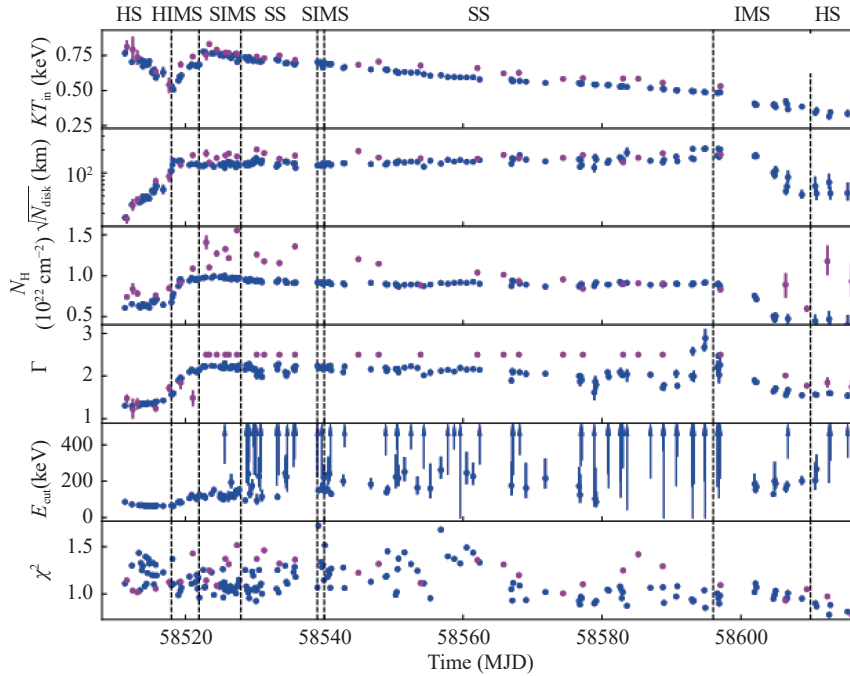


图 3 2019年爆发的MAXI J1348-630的HXMT (蓝色)和Swift (紫色)的能谱参数演化. 从上到下: 盘的色温度、diskbb成分的归一化平方根、氢吸收柱密度、光子指数、截断能以及约化卡方值. 图取自Zhang等^[35].

Fig. 3 Evolution of the *Insight*-HXMT (blue) and *Swift* (purple) spectral parameters of MAXI J1348-630 during its 2019 outburst. From top to bottom: the inner-disc color temperature, the square root of the normalization of the diskbb component, the hydrogen absorption column density, the power-law photon index, the exponential roll-off energy, and reduced chi-square. The figure is from Zhang et al.^[35].

3.3 4U 1543-47在2021年的爆发研究

在经历了长达21 yr的宁静态后, 黑洞X射线双星4U 1543-47于2021年发生了一次新的爆发, 其峰值流量达到8 Crab. 得益于HXMT在高流量条件下不受探测器堆积效应的影响, 该源的爆发过程得到了高频次的观测. Zhao等^[37]综合利用HXMT、NuSTAR (Nuclear Spectroscopic Telescope Array) 和Swift卫星的观测数据, 对该源在此次爆发过程中的吸积动力学和几何结构进行了深入研究. 对HXMT的低能(黑色)和中能(红色)数据进行了最佳拟合及残差分析如图5所示. 通过能谱分析, 作

者发现当源处于软态时存在显著的反射成分, 如图5中紫色线所示. 作者提出, 这一反射可能源于吸积盘内区光子在强引力场作用下发生轨迹弯曲, 从而重新照射到吸积盘表面, 即产生自辐射效应. 值得注意的是, 最佳拟合参数表明该反射成分贡献了总流量的50%以上. 作者进一步采用广义相对论射线追踪模拟方法, 发现当吸积率接近或超过爱丁顿极限时, 吸积盘会呈现几何厚度显著、漏斗状的结构特征, 从而成功再现了观测结果. 对于4U 1543-47, 特别是当吸积盘表面与赤道平面之间的夹角 $\geq 45^\circ$ 时, 可以合理地解释观测到的自辐

射强度. 这一研究不仅揭示了高吸积率下吸积盘的几何结构演化, 还为理解强引力场环境下的辐

射过程及其观测特征提供了新的观测证据和理论支持.

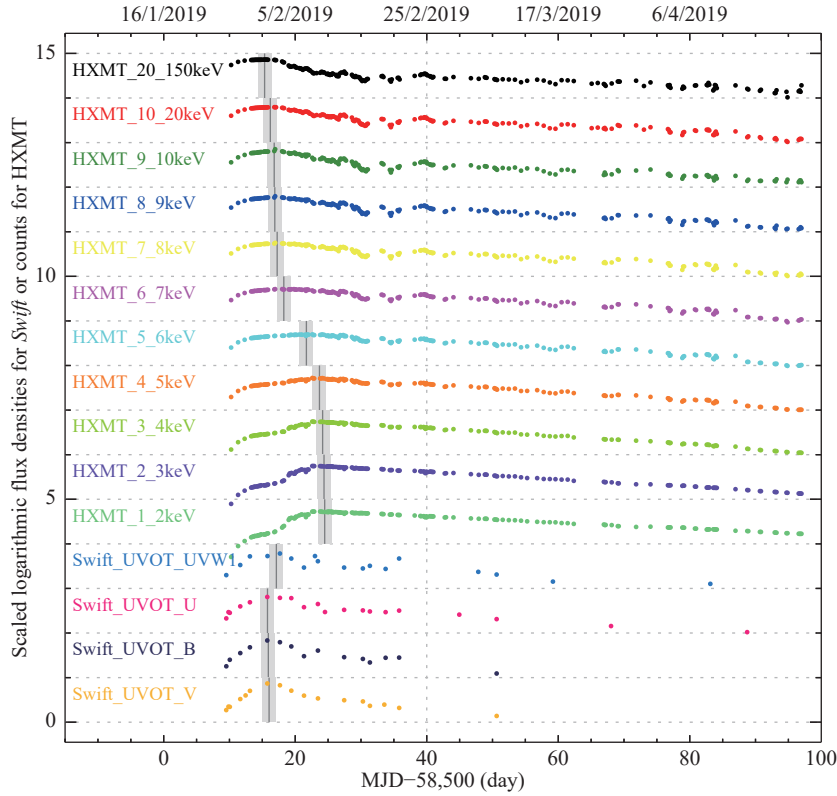


图 4 MAXI J1348-630 的光变曲线. HXMT 流量密度单位是 count/s, Swift 流量密度单位是 mJy, 它们以对数方式归一, 标准差为 0.2. 为清晰展示, 图中对不同颜色的曲线进行了垂直方向的平移处理. 每个光变曲线的第 1 个显著峰值(灰色垂直实线), 由四次多项式拟合确定, 其不确定性为 ± 1 d (浅灰色虚线区域). 在浅灰色虚垂线之前的光变曲线, 采用线性插值的交叉相关方法估计它们相对于最高能(20-150 keV) 光变的时间延迟. 图取自 Weng 等^[36].

Fig. 4 Light curves of MAXI J1348-630. The original HXMT fluxes are given in units of count/s and the Swift flux densities in mJy, which are rescaled in logarithm such that their standard deviations are 0.2 and shifted vertically for clarity. The first prominent peak of each light curve determined by a fourth-order polynomial fit is marked as the gray solid vertical line with uncertainty of ± 1 day in the light-gray region. The light curves before the light-gray dotted vertical line are adopted to estimate their lags relative to the one in the shortest wavelength band, i.e., the HXMT 20-150 keV band, using the linearly interpolated crosscorrelation method. The figure is from Weng et al.^[36].

3.4 Swift J1727.8-1613 在 2023 年的爆发研究

Swift J1727.8-1613 是一个于 2023 年 8 月首次被 Swift 卫星探测到的新 X 射线暂现源, 后续的多波段观测确认其为黑洞 X 射线双星. 在此次爆发过程中, 该源的峰值亮度高达 7 Crab, HXMT 对其进行了高频次监测. Liu 等^[38]和 Peng 等^[39]结合 HXMT、NuSTAR 以及 NICER (Neutron star Interior Composition Explorer) 的准同时观测数据, 对该源的

X 射线能谱特性进行了详细分析. 能谱拟合结果表明, 与典型的黑洞 X 射线双星能谱不同, 该源的能谱中存在一个显著的额外硬成分. 基于这一发现, Peng 等^[39]在考虑了该成分的影响后, 估算出源的自旋参数为 $0.98^{+0.02}_{-0.04}$, 同时测得吸积盘的倾角约为 40° . Peng 等^[39]提出, 该额外的硬成分可能与相对论性喷流或慢速喷流下方的喷流基底或者冕有关, 为理解该源的高能辐射机制提供了新的视角.

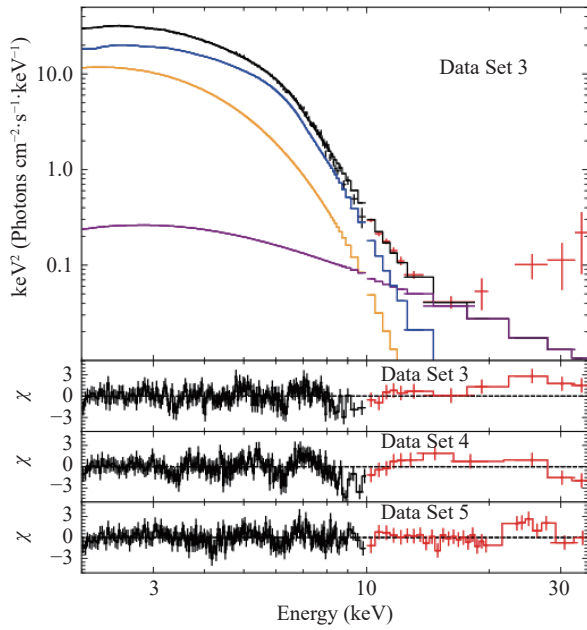


图 5 基于 $\text{tbabs} * (\text{diskbb} + \text{nthcomp} + \text{relxillNS})$ 模型的 HXMT 低能 (黑色) 和中能 (红色) 数据的最佳拟合及残差分析. 其中, 黑色实线表示总模型拟合结果, 而橙色、紫色和蓝色实线分别对应 diskbb 、 nthcomp 和 relxillNS 组分的贡献. 图取自 Zhao 等^[37].

Fig. 5 Based on the $\text{tbabs} * (\text{diskbb} + \text{nthcomp} + \text{relxillNS})$ model, the best-fit and residual analysis were performed for the HXMT low energy (black) and medium energy (red) data. The black solid line represents the total model fit, while the orange, purple, and blue solid lines correspond to the contributions from the diskbb , nthcomp , and relxillNS components, respectively. The figure is from Zhao et al.^[37].

3.5 H 1743–322 在 2018 年的失败的态转换爆发

除了以上黑洞 X 射线双星的完整爆发, 还存在一些仅演化到硬态或者中间态的失败的态转换爆发. Wang 等^[40]发现黑洞暂现源 H 1743–322 在 2018 年的失败的态转换爆发, 使用了 HXMT、NICER 和 NuSTAR 的观测数据, 覆盖了从 1 到 120 keV 的宽波段 X 射线数据. 作者通过对整个爆发期间源的能谱和时变性质的分析, 发现尽管该源在峰值流量时表现出轻微的软化趋势, 但其在整个爆发过程中始终处于硬态, 即 H 1743–322 的这次爆发是未进入到软态的失败的态转换爆发, HID 如图 6 所示. 作者还重点研究了 type-C QPO 的性质演化, 发现 QPO 的中心频率在爆发上升阶段从约 0.1 Hz 增加到约 0.4 Hz, 并在爆发下降阶段减小. 此外, 作者发现连续谱的 X 射线流量、光子指数、QPO 频

率和 QPO 均方根振幅之间的正相关性. 软 X 射线波段的 QPO 振幅 (12%–16%) 略高于硬 X 射线波段的 QPO 振幅 (8%–10%). 通过对失败的态转换爆发和成功爆发的能谱和时变性质的对比分析, 作者发现尽管这次失败的态转换爆发的吸积率并未达到转变为软态的阈值, 但是这两类爆发遵循相同的初始演化轨迹. 这项工作丰富了黑洞暂现源爆发的样本, 对进一步理解其爆发机制具有重要意义.

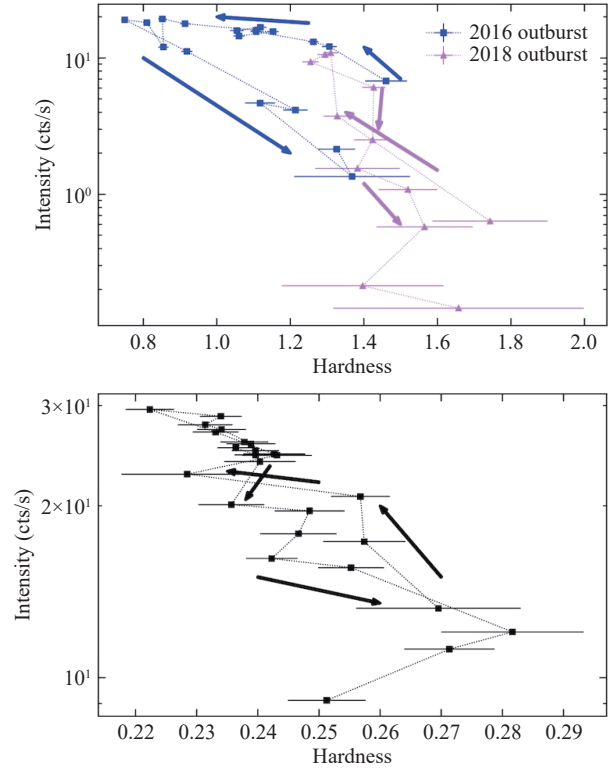


图 6 上图: H 1743–322 的 *Swift*/XRT 的强度-硬度图. 蓝色方框和粉色三角形分别代表 2016 年的成功爆发和 2018 年的失败的态转换爆发. 强度为 1–10 keV 计数率, 硬度是 6.0–10.0 keV 的计数率与 1.0–6.0 keV 的计数率之比. 下图: HXMT 观测的 H 1743–322 强度-硬度图. 强度和硬度的能量范围与上图相同. 箭头代表时间演化. 图取自 Wang 等^[40].

Fig. 6 Top panel: hardness-intensity diagram track derived from *Swift*/XRT of H 1743–322. Blue squares and pink triangles represent the 2016 successful outburst and the 2018 failed transition outburst, respectively. The intensity is the 1–10 keV count rate. The hardness is the ratio of the count rates between 6.0–10.0 keV and 1.0–6.0 keV. Bottom panel: HXMT hardness-intensity diagram of H 1743–322. The energy ranges of intensity and hardness are the same as the top panel. Arrows in each panel represent the time evolution. The figure is from Wang et al.^[40].

4 总结与展望

黑洞X射线双星系统作为高能天体物理的重要研究对象,其复杂的爆发演化过程一直是天文学家关注的焦点.通过对这些暂现源系统爆发演化的研究,我们能够深入了解黑洞的吸积几何及其演化和吸积辐射的物理规律.慧眼卫星的运行这一领域的研究提供了宝贵的观测数据,特别是在宽波段X射线监测能力和高频次观测方面,可以对黑洞X射线双星的短时标光变和能谱特性进行更深入的研究.从典型的完整爆发到“失败的态转换爆发”,慧眼卫星的数据在研究黑洞X射线双星的爆发机制、构建吸积辐射模型以及限制源的基本性质等方面发挥了重要的作用.此外,随着我国新一代空间科学卫星——增强型X射线时变与偏振空间天文台(enhanced X-ray Timing and Polarimetry mission, eXTP)项目的推出,我们有望揭示更多关于黑洞X射线双星系统的秘密,推动高能天体物理学领域的进一步发展.

致谢 感谢审稿人对文章提出的宝贵建议,使得文章的质量有了显著的提高.感谢慧眼核心科学组和地面系统组的支持与帮助.

参考文献

- [1] McClintock J E, Remillard R A. Black Hole Binaries// W H G Lewin and M van der Klis, Eds. Compact Stellar X-ray Sources, Cambridge: Cambridge University Press, 2006, 157-213
- [2] Sunyaev R A, Titarchuk L G. A&A, 1980, 86: 121
- [3] Gilfanov M. LNP, 2010, 794: 17
- [4] van der Klis M, Jansen F, van Paradijs J, et al. Nature, 1985, 316: 225
- [5] van der Klis M. ARA&A, 1989, 27: 517
- [6] Zhang S N, Li T, Lu F, et al. SCPMA, 2020, 63: 249502
- [7] Li C K, Lin L, Xiong S L, et al. NatAs, 2021, 5: 378
- [8] Ma X, Tao L, Zhang S N, et al. NatAs, 2021, 5: 94
- [9] You B, Tuo Y, Li C, et al. NatCo, 2021, 12: 1025
- [10] Méndez M, van der Klis M. ApJ, 1997, 479: 926
- [11] Homan J, Wijnands R, van der Klis M, et al. ApJS, 2001, 132: 377
- [12] Homan J, Belloni T. Ap&SS, 2005, 300: 107
- [13] Remillard R A, McClintock J E. 2006, ARA&A, 44: 49
- [14] McClintock J E, Haswell C A, Garcia M R, et al. ApJ, 2001, 555: 477
- [15] Done C, Gierliński M, Kubota A. A&ARv, 2007, 15: 1
- [16] Done C, Diaz Trigo M. MNRAS, 2010, 407: 2287
- [17] Miller J M, Homan J, Steeghs D, et al. ApJ, 2006, 653: 525
- [18] Esin A A, McClintock J E, Narayan R. ApJ, 1997, 489: 865
- [19] Remillard R A, Sobczak G J, Munro M P, et al. ApJ, 2002, 564: 962
- [20] Fender R P. MNRAS, 2001, 322: 31
- [21] Gierliński M, Done C, Page K. MNRAS, 2008, 388: 753
- [22] Cúneo V A, Alabarta K, Zhang L, et al. MNRAS, 2020, 496: 1001
- [23] Casella P, Belloni T, Stella L. ApJ, 2005, 629: 403
- [24] Fender R P, Belloni T M, Gallo E. MNRAS, 2004, 355: 1105
- [25] Motta S E. AN, 2016, 337: 398
- [26] Brocksopp C, Bandyopadhyay R M, Fender R P. NewA, 2004, 9: 249
- [27] Tetarenko B E, Sivakoff G R, Heinke C O, et al. ApJS, 2016, 222: 15
- [28] Capitanio F, Belloni T, Del Santo M, et al. MNRAS, 2009, 398: 1194
- [29] Alabarta K, Altamirano D, Méndez M, et al. MNRAS, 2021, 507: 5507
- [30] Ma R C, Soria R, Tao L, et al. MNRAS, 2022, 514: 5238
- [31] Soria R, Ma R, Tao L, et al. MNRAS, 2022, 515: 3105
- [32] Peng J Q, Zhang S, Wang P J, et al. ApJ, 2023, 955: 96
- [33] Peng J Q, Zhang S, Chen Y P, et al. MNRAS, 2023, 518: 2521
- [34] You B, Cao X, Yan Z, et al. Science, 2023, 381: 961
- [35] Zhang W, Tao L, Soria R, et al. ApJ, 2022, 927: 210
- [36] Weng S S, Cai Z Y, Zhang S N, et al. ApJ, 2021, 915: L15
- [37] Zhao S J, Tao L, Li P P, et al. A&A, 2024, 685: A42
- [38] Liu H X, Xu Y J, Zhang S N, et al., arXiv: 2406.03834
- [39] Peng J Q, Zhang S, Shui Q C, et al. ApJ, 2024, 960: L17
- [40] Wang P J, Kong L D, Chen Y P, et al. MNRAS, 2022, 512: 4541

Study of Outburst Evolution in Black Hole X-ray Binaries with *Insight*-HXMT

MA Rui-can^{1,2}

(1 Key Laboratory of Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

(2 Dongguan Neutron Science Center, Dongguan 523808)

ABSTRACT The *Insight*-HXMT (Insight Hard X-ray Modulation Telescope) satellite has achieved a series of significant scientific breakthroughs during its on-orbit operation, thanks to its unique broadband coverage (1–250 keV) and large effective area. By monitoring the outburst evolution of numerous black hole X-ray binaries (BHXBs), *Insight*-HXMT has provided crucial observational data for investigating accretion processes during these events. These outbursts include not only typical full outbursts, which progress through hard, intermediate, and soft states, but also “failed transition outbursts”, where the system remains in the hard or intermediate states without fully transitioning. The broadband capabilities of *Insight*-HXMT offer a valuable opportunity to gain deeper insights into the properties of the accretion disc, corona, and jet in BHXBs. Furthermore, these observations play a crucial role in advancing our understanding of BHXBs outburst mechanisms and accretion radiation physics. This article focuses on the evolution and characteristics of BHXBs outbursts as revealed by *Insight*-HXMT data.

Key words accretion, accretion disks, X-rays, binaries, stars: black holes